

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Laboratoř přenosu tepla a proudění

Ing. Jiří Kvapil

TEPELNÝ ODPOR V KONTAKTU ZA VYSOKÝCH TEPLOT

THERMAL CONTACT RESISTANCE UNDER HIGH TEMPERATURE

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Inženýrská mechanika

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.

Školitel specialista: Ing. Michal Pohanka, Ph.D.

Oponenti:

Datum obhajoby:

Klíčová slova

Vedení tepla, přenos tepla, tepelný odpor v kontaktu, součinitel přestupu tepla v kontaktu, inverzní úloha

Keywords

Heat conduction, heat transfer, thermal contact resistance, thermal contact conductance, inverse task

Dizertační práce je dostupná v tištěné podobě na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
2.1 Tepelný odpor v kontaktu	6
2.2 Sekvenční identifikační metoda	7
3 CÍLE PRÁCE	9
4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	11
4.1 Experimentální zařízení	11
4.2 Numerický model	13
4.3 Inverzní úloha pro výpočet tepelného odporu.....	15
4.4 Popis experimentu a jeho vyhodnocení	16
4.5 Výsledky	18
4.6 Zhodnocení výsledků.....	23
5 ZÁVĚR	25
6 LITERATURA.....	27
ABSTRAKT	28
ABSTRACT.....	28
ŽIVOTOPIS	29

1 ÚVOD

Tváření kovů je výrobní (technologický) postup, který dává kovu požadovaný tvar tím, že tvářecím nástrojem přemísťujeme jeho části převážně tlakem, méně často smykem, kroucením nebo tahem. Tváření kovů je podmíněno jejich tvářitelností. Tvářitelnost kovů je založena na plasticitě, tj. schopnosti snést určité trvalé přemístění svých částí bez porušení soudržnosti.

Při tváření kovů dochází ke kontaktu dvou a více těles, a pokud tyto tělesa mají rozdílnou teplotu, dochází k přestupu tepla. Hlavní náplní této práce bude tento přestup tepla mezi tělesy popsat pomocí okrajových podmínek ve tvaru součinitele přestupu tepla v kontaktu.

Válcování je jednou ze základních technologií tváření kovů v hutnickém průmyslu. I přes dlouhodobý vývoj technologie válcování je zde stále prostor pro zlepšení a zefektivnění výroby. S rozvojem výpočetní techniky a nástupem možnosti komplexně simulovat tvářecí procesy je zde stále větší poptávka po okrajových podmínkách pro tyto simulace. Při válcování za tepla dochází k velmi intenzivnímu přenosu energie z provačku do válce. Na druhou stranu po velmi krátké době, po výstupu z válcovací mezery, dochází k prudkému poklesu teplot, který je způsobený chlazením válce pomocí vodních trysek. Tyto rychlé změny povrchových a podpovrchových teplot se cyklicky střídají a mají vliv na životnost válce. Pomocí numerického modelování můžeme tyto rychlé děje simulovat a analyzovat. Detailní analýzy teplotního pole ve válci lze využít k optimalizaci teplotně – napjatostních stavů a minimalizaci cyklického namáhání válce. Cílem optimalizace teplotních režimů válců je tedy prodloužení životnosti válců a tím i značná úspora finančních prostředků.

Nezbytnými vstupními parametry pro realistickou simulaci válcování je okrajová podmínka (součinitel přestupu tepla) definující přestup tepla mezi vodním chlazením válce a válcem, kterou dokážeme experimentálně změřit. Druhá okrajová podmínka (součinitel přestupu tepla v kontaktu) na rozhraní mezi válcem a válcovaným materiálem nám určuje, kolik tepla přejde z válcovaného tělesa do válce. Získání této okrajové podmínky experimentálně se ukazuje jako problematické z technické obtížnosti (vysoké teploty a tlak). Jedním z možných způsobů je použití podpovrchového měření teploty a inverzní úlohou spočítané okrajové podmínky. Instalace termočlánku do válce je problematická, narušuje strukturu povrchu a pevnostní odolnost instalovaného sensoru je limitující pro některé způsoby válcování. Dosud provedené experimenty měřily pouze v omezeném rozsahu válcovacích parametrů. V literatuře nebyl problém popisující

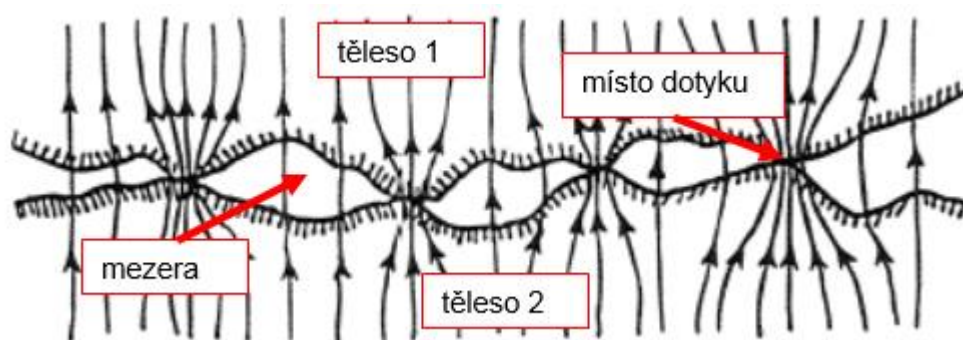
přestup tepla na rozhraní válce a válcovaného materiálu pomocí součinitele přestupu tepla do této doby uspokojivě popsán, a proto se jím tato práce zabývá.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 TEPELNÝ ODPOR V KONTAKTU

Jestliže jsou dvě tělesa v kontaktu, vznikne mezi nimi nedokonalý spoj (rozhraní). To, jakým způsobem teplo mezi oběma tělesy přestupuje, zajímalo velké množství vědců již od roku 1930 a od této doby bylo na toto téma publikováno mnoho článků, knih, technických zpráv atd. Z tohoto důvodu můžeme usoudit, že přestup tepla mezi dvěma tělesy je jak z vědeckého, tak z komerčního hlediska velmi zajímavým tématem.

Vznik nedokonalého spoje je způsoben hlavně drsností obou povrchů těles a jejich tvarem. V případě, že jsou obě tělesa rovinného tvaru, jejich spoj se skládá z mnoha diskrétních mikrokontaktů, které jsou ve spoji rozloženy náhodně, pokud jsou obě tělesa rovinného tvaru. Pokud těleso nemá rovinný tvar, jsou mikrokontakty rozloženy do určité oblasti spoje. Velikost mikrokontaktů a jejich hustota ve spoji závisí na parametrech určujících drsnost povrchu a fyzikálních vlastnostech materiálu. Dalším parametrem, který ovlivní velikost a rozložení mikrokontaktů ve spoji, je velikost tlaku v kontaktu a typ deformace nerovností na povrchu obou těles. V místě, kde ve spoji nedochází k přímému dotyku obou materiálů, vzniká mezera. V mezeře se nejčastěji nachází tekutina (např. vzduch, voda, olej atd.).



Obrázek 1: Detail kontaktu povrchů dvou materiálů [1]

Přenos tepla mezi dvěma tělesy v kontaktu může nastat pomocí:

- kondukce přes místo přímého dotyku (mikrokontakt),
- kondukce a konvekce přes mezeru,
- radiace přes mezeru.

Celkový tepelný výkon přes kontakt je součtem tří dílčích tepelných výkonů:

$$Q = Q_d + Q_m + Q_r, \quad (1)$$

kde Q_d , Q_m a Q_r jsou tepelné výkony přes místo dotyku, mezeru a radiací.

Kondukce přes místa dotyku je hlavní složkou přenosu tepla, i když tento přestup tepla probíhá na velmi malých plochách. Definujme zdánlivou plochu A_z jako plochu společného kontaktu dvou těles a skutečnou plochu A_s jako plochu, která udává součet ploch všech mikrokontaktů ve spoji. Obvyklá plocha mikrokontaktů při nezátížení stavu je asi 0,01 – 0,1% ze zdánlivé plochy [2]. I při tlacích v řádech desítek MPa tvoří celková plocha mikrokontaktů pouze 1 – 2 % ze zdánlivé plochy (platí pro většinu kovových materiálů) [3].

Přestup tepla přes rozhraní mezi dvěma tělesy vede k omezení tepelného toku, které označujeme jako tepelný odpor v kontaktu, který je definován jako [1]:

$$R_k = \frac{\Delta T}{Q}, \quad (2)$$

kde Q je tepelný výkon a ΔT je teplotní pokles na rozhraní.

Reciproční k tepelnému odporu je součinitel přestupu tepla v kontaktu h_k :

$$h_k = \frac{1}{AR_k} = \frac{Q}{A\Delta T} = h_d + h_m + h_r, \quad (3)$$

kde A je plocha spoje obou těles, h_d , h_m a h_r jsou součinitele přestupu tepla přes místo dotyku, mezeru a radiací.

2.2 SEKVENČNÍ IDENTIFIKAČNÍ METODA

Sekvenční identifikační metoda využívá teplotní historii získanou pomocí teplotního čidla uvnitř chlazeného nebo ohřívajícího tělesa k výpočtu součinitele přestupu tepla h (ale i jiných okrajových podmínek, např. tepelný tok) v každém časovém kroku. Tato metoda používá sekvenční odhad časově proměnných okrajových podmínek s využitím dopředných kroků ke stabilizaci špatně podmíněné inverzní úlohy. K určení neznámého součinitele přestupu tepla h v čase t_m je

změřená teplota T_m^* v teplotním čidle porovnána s nasimulovanou teplotou z dopředného řešiče za použití n dopředných kroků

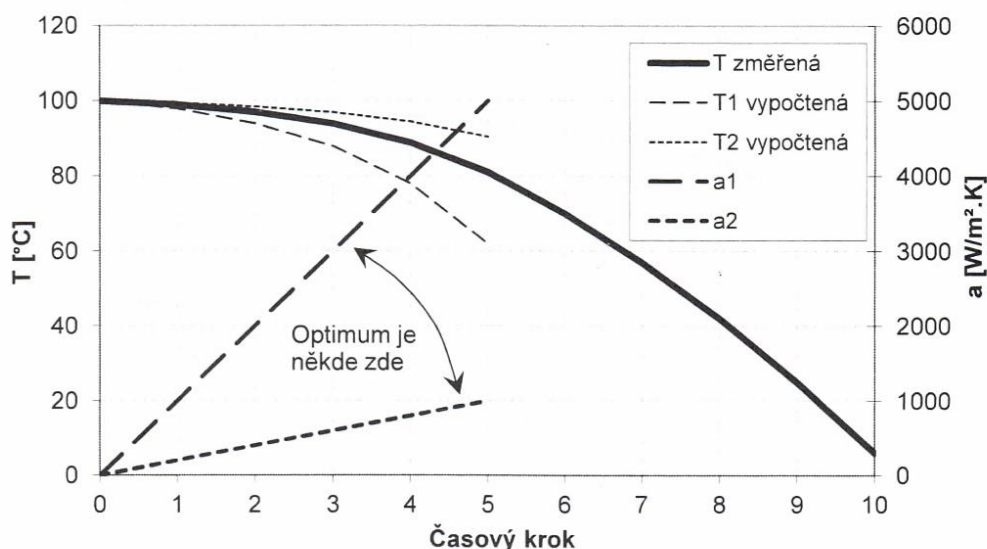
$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+n} (T_i^* - T_i)^2. \quad (4)$$

Směrnice lineárně se měnícího součinitele přestupu tepla h je definována

$$v = \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (5)$$

je měněna tak dlouho, dokud není nalezeno minimum rovnice (4).

Odhad nejmenšího počtu dopředných kroků je popsán [4]. Teploty T^* se získají přímým výpočtem vedení tepla, přičemž hodnota součinitele přestupu tepla se aplikuje tak, že se zvolí její směrnice v a vychází se z poslední známé hodnoty součinitele přestupu tepla h .

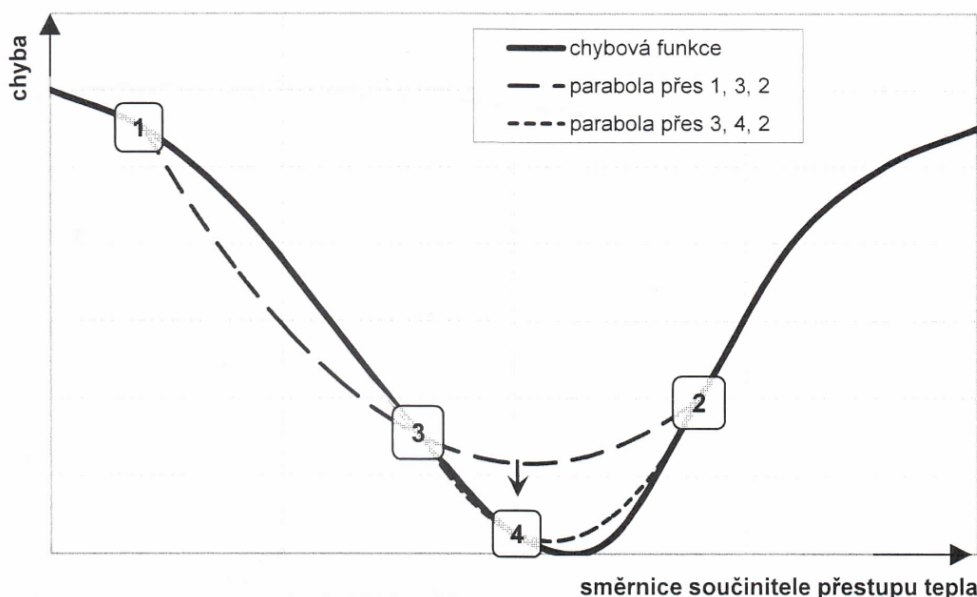


Obrázek 2: Graf změřené teploty a dvou vypočtených teplot pro dvě různé směrnice součinitele přestupu tepla s použitím n dopředných kroků

Příklad vypočtených teplot je znázorněn viz Obrázek 2 jako křivky $T1$ a $T2$, přičemž použité průběhy součinitele přestupu tepla jsou znázorněny úsečkami $a1$ a $a2$. Protože naměřený průběh teplot je mezi vypočtenými teplotami $T1$ a $T2$, bude optimální směrnice součinitele přestupu tepla mezi hodnotami použitých pro úsečky $a1$ a $a2$.

Optimální směrnice se nalezne pomocí Brentovy optimalizační metody [5]. Pro vypočtené průběhy teplot $T1$ a $T2$ se vypočítá chyba, která je znázorněna body 1 a 2

viz Obrázek 3. Obdobně se vypočítá chyba pro směrnici součinitele přestupu tepla a_3 , která je v grafu znázorněna bodem 3. Body 1, 2 a 3 se proloží parabola. Vypočte se minimum paraboly a pro tuto hodnotu součinitele přestupu tepla se spočítá chyba (bod 4). Bod s největší chybou se nebere v úvahu a zbylými třemi body se opět proloží parabola. Postup se opakuje až je nalezena optimální směrnice součinitele přestupu tepla. Parametr f se volí tak, aby byla inverzní úloha stabilní. Příliš malé hodnoty vedou k nestabilitě inverzní metody a příliš velké hodnoty vedou k velkému vyhlazení prudkých změn součinitele přestupu tepla.



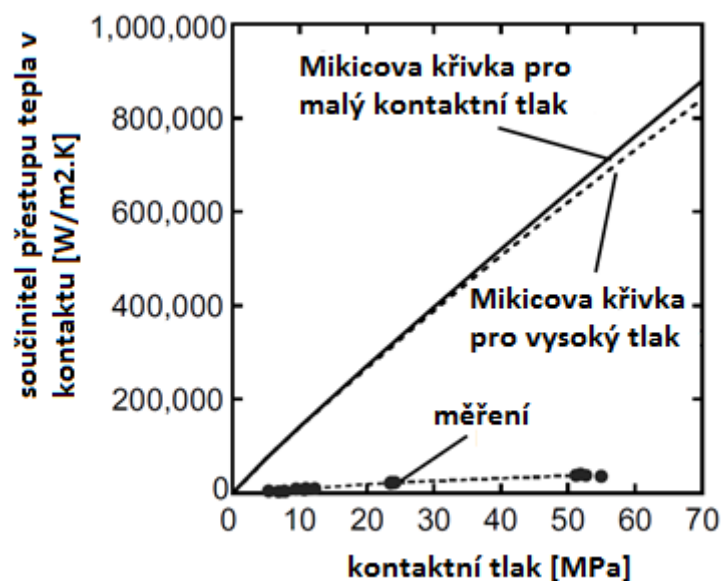
Obrázek 3: Konvergence k minimu pomocí inverzní parabolické interpolace

3 CÍLE PRÁCE

Tato práce je zaměřena na měření tepelného odporu (resp. součinitele přestupu tepla) v kontaktu zjištěného pomocí experimentálních měření za podmínek, které panují při tváření kovů a válcování za tepla – vysoké teploty (až 1000 °C) a vysoký kontaktní tlak (až 100 MPa). Zkoumaným materiálem této práce je nerezová ocel DIN 1.4828.

Existuje několik empirických modelů pro odvození tepelného odporu v kontaktu, které jsou hojně využívány. Tyto modely se dají použít pouze, pokud kontaktní tlak nepřesáhne 7 MPa [6]. Další důležitým faktorem ovlivňujícím velikost tepelného odporu je teplota materiálu, která spolu s kontaktním tlakem ovlivňuje deformaci povrchu při kontaktu dvou těles. Fieberg [7] uvádí, že závislost tepelného odporu na teplotě materiálu je znatelná až nad 500 °C pro ocel, do této hodnoty nemá teplota na velikost tepelného odporu znatelný vliv, což je v rozporu s výsledky publikovanými v [10]. Fieberg ve svém článku také uvádí srovnání hodnot tepelného

odporu v kontaktu (ocel a hliník) mezi používanými empirickými modely a jeho experimentálními měřeními (Obrázek 4), kde je vidět značná nadhodnocenost součinitele přestupu tepla v kontaktu při vysokých tlacích.



Obrázek 4: Srovnání hodnot tepelného odporu v kontaktu mezi teoretickými modely (Mikic) a experimentálním měřením, tělesa v kontaktu: ocel – hliník [7]

Rovněž Wang [8] ve své rešerši uvádí, že pokrok v určení tepelného odporu v kontaktu se neobejde bez vývoje nových experimentálních metod a s nimi spojenými experimentálními měřeními.

Znalost chování tepelného odporu v kontaktu za vysokých teplot a kontaktních tlaků je velmi důležitá pro hutní průmysl, kde se v poslední době objevují stále přesnější numerické modely vedení tepla, které výzkumníkům dávají představu, jak výrobní proces funguje a vzniká tak prostor pro vylepšení. Důležitým parametrem pro numerické simulace vedení tepla je tepelný odpor (resp. součinitele přestupu tepla) v kontaktu, který je ale pro potřeby hutního průmyslu v literatuře popsán jen velmi málo. Tato práce si dává za cíl tento stav zlepšit a najít způsob, jak pomocí experimentálního měření určit tepelný odpor v kontaktu pro vysoké teploty a vysoké kontaktní tlaky.

Cílem práce bylo tedy vyvinout metodiku měření tepelného odporu pomocí vlastního experimentálního zařízení, která bude použitelná pro různé variace nastavení kontaktního odporu, tj. bude možnost nastavit různý kontaktní tlak, teplotní rozdíl mezi tělesy v kontaktu, typ materiálu, drsnost povrchu kontaktních ploch, přítomnost okují atd.

Dalším cílem práce je shrnutí experimentálních výsledků a nalezení obecného vztahu, který by vyjadřoval velikost součinitele přestupu tepla v kontaktu v závislost na kontaktním tlaku, teplotě a drsnosti povrchu pro kontakt dvou těles z nerezové oceli DIN 1.4828.

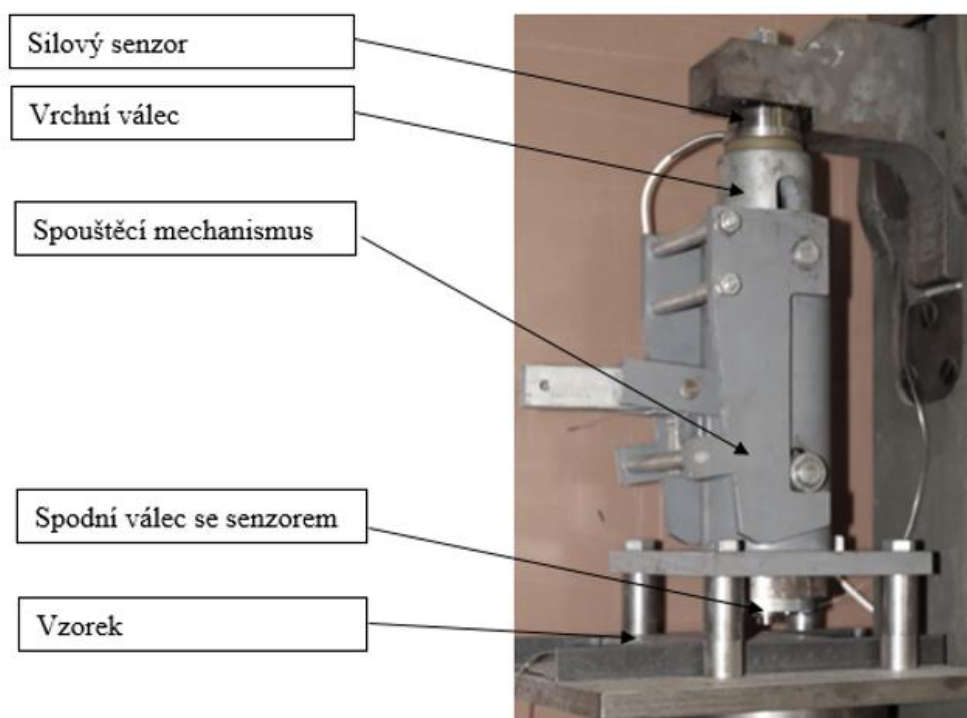
4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

K popisu tepelného odporu mezi dvěma tělesy je zapotřebí experimentální zařízení, které umožní zkoumat tepelný odpor pomocí vhodně zvoleného souboru experimentů. Experiment spočívá v měření teploty při kontaktu dvou těles s rozdílnou teplotou. Jedno z těles se nahřeje na požadovanou teplotu v elektrické peci a po vytažení se co nejrychleji vloží do experimentálního zařízení, kde se vytvoří kontakt s druhým tělesem za požadovaného tlaku. Teploty se měří pomocí termočlánků v definovaném místě uvnitř obou těles. Poté jsou záznamy teplot použity v numerickém modelu a pomocí inverzní úlohy vedení tepla je vypočítána velikost tepelného odporu pro daný experiment. Experimenty se navzájem liší různým nastavením parametrů (kontaktní tlak, teplota těles, drsnost povrchu).

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Zařízení umožňuje vytvořit v krátkém časovém okamžiku kontakt mezi dvěma tělesy. Důležitým parametrem tepelného odporu je kontaktní tlak, a proto byl kladen důraz, aby u experimentálního zařízení byla možnost nastavit kontaktní tlak dle potřeby. Dalším požadavkem byla možnost co nejrychlejšího vložení nahřátého vzorku z elektrické pece do experimentálního zařízení a zahájení experimentu. Důvodem je, že jednou ze vstupních podmínek pro výpočet tepelného odporu v kontaktu je ustálená teplota ve vzorku při vzniku kontaktu se senzorem. Pokud se vzorek přesunuje z pece do experimentálního zařízení dochází k jeho ochlazování. Po několika experimentech se ukázalo, že tento problém se vyskytuje u nerezové oceli při teplotě nad 500 °C z důvodu radiace.

Kostru zařízení (Obrázek 5) tvoří ocelové tělo ve tvaru dutého válce, ve kterém jsou uvnitř umístěny dva válce (horní a dolní), které se mohou pohybovat pouze ve vertikálním směru. Mezi těmito válci je umístěna pružina, která slouží k vytvoření požadovaného kontaktního tlaku mezi dvěma tělesy (senzor a vzorek).



Obrázek 5: Experimentální zařízení

Spodní válec tvoří jednu z aktivních ploch kontaktu a je vybaven senzorem (Obrázek 6), který je ve tvaru válce (průměr podstavy 12 mm, výška 10 mm), ve kterém je zabudován termočlánek typu K o průměru 0,5 mm. Tento termočlánek je umístěn 1 mm pod povrchem od kontaktní plochy a slouží k záznamu teploty během experimentu. Další částí zařízení je vzorek, který je ve tvaru válce s průměrem 25 mm a výškou 20 mm a pomocí něho se mění parametry, které ovlivňují velikost kontaktního odporu v kontaktu (typ materiálu, počáteční teplota, drsnost povrchu, přítomnost okují).

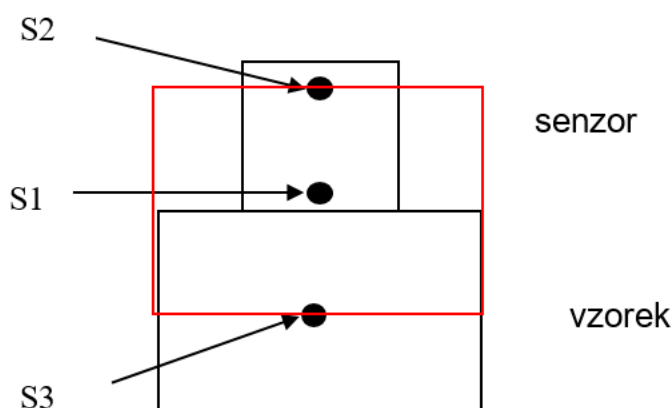


Obrázek 6: Detail kontaktu senzoru a vzorku

4.2 NUMERICKÝ MODEL

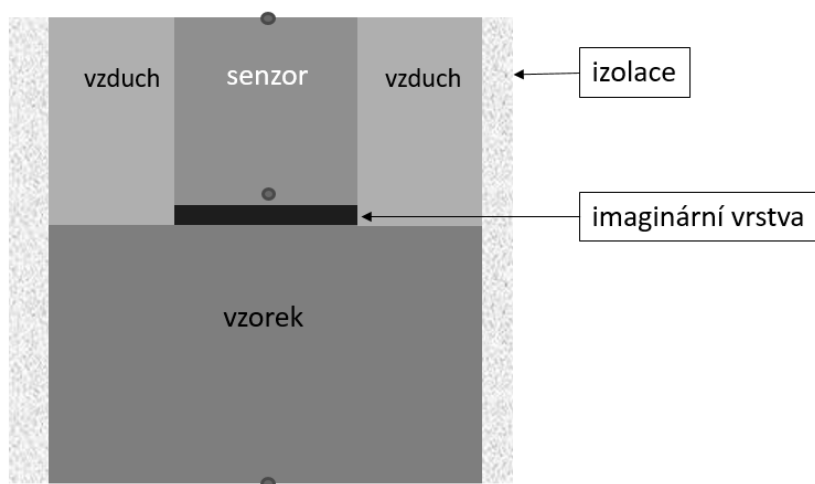
Důležitou částí této práce bylo vytvořit numerický model, který by sloužil k zpětné simulaci experimentálního měření a s využitím inverzní úlohy vedení tepla k následnému výpočtu tepelného odporu během experimentu.

Byl vytvořen model (Obrázek 7), v němž se použily tři termočlánky, dva v senzoru a třetí ve vzorku. Červený obdélník značí oblast, která je simulována pomocí numerického modelu.



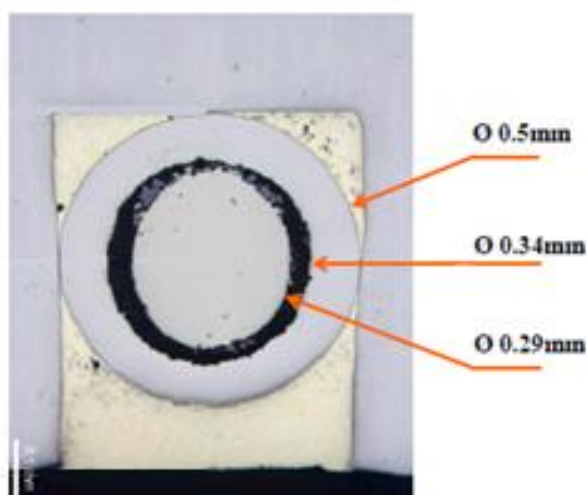
Obrázek 7: Náčrt kontaktu senzoru a vzorku

Součástí numerického modelu (Obrázek 8) je sensor, vzorek a mezi ně je vložena imaginární vrstva, volné místo kolem senzoru je vyplněno vzduchem. Úkolem této vrstvy je řídit přestup tepla mezi vzorkem a senzorem. Imaginární vrstva má tloušťku 0,01 mm a množství tepla, které se předá mezi vzorkem a senzorem v každém časovém kroku výpočtu je nastaveno pomocí součinitele tepelné vodivosti této vrstvy.



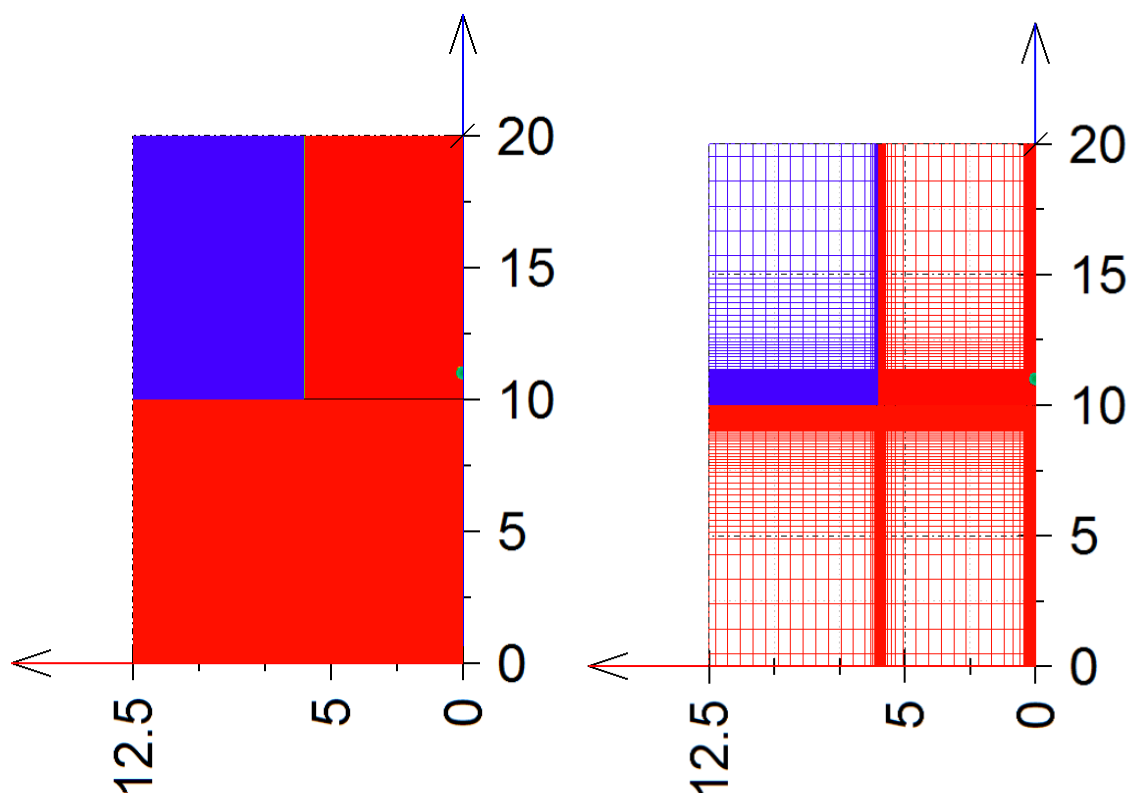
Obrázek 8: Návrh numerického modelu

Součástí modelu je i termočlánek S1 včetně jeho vnitřní struktury. Termočlánek typu K (Obrázek 9) je tvořen vnějším obalem z inconelu s vnějším průměrem 0,5 mm a vnitřním 0,34 mm. Izolaci mezi obalem a kuličkou termočlánu tvoří oxid hořečnatý (černá barva) a uprostřed je útvar kulového tvaru s průměrem 0,29 mm, který vznikne jako svařenec z chromelu a alumelu, které tvoří termočlánekové vedení.



Obrázek 9: Řez termočlánekem typu K o průměru 0,5 mm [9]

Termočláanky S2 a S3 slouží jako okrajové podmínky pro vrchní a spodní stranu numerického modelu. Jejich vnitřní strukturu v modelu zanedbáváme z důvodu pomalé změny teploty v místech jejich umístění. Z levé a pravé strany je model izolován, tj. okrajová podmínka je nastavena na nulový tepelný tok.



Obrázek 10: Výpočetní síť numerického modelu, osy jsou v milimetrech

Na Obrázek 10 (vpravo) je znázorněn osově symetrický 2D model s jednotlivými elementy. Červená barva znázorňuje pevný materiál (nerezová ocel DIN 1.4828) a modrá vzduch. Součástí je i termočlánek se všemi jeho částmi.

4.3 Inverzní úloha pro výpočet tepelného odporu

K výpočtu velikosti tepelného odporu je použita sekvenční identifikační metoda s rozdílem, že se místo součinitele přestupu tepla optimalizuje vodivost imaginární vrstvy v každém časovém kroku tak, aby nasimulovaná teplota v místě termočláčku S1 byla co nejvíce podobná naměřené teplotě během experimentu. Výsledný tepelný odpor R_i se vypočte jako

$$R_i = \frac{\Delta x}{k_i}, \quad (6)$$

kde Δx je tloušťka imaginární vrstvy (v případě této práce byla nastavena na 0,01 mm), k je vypočtená tepelná vodivost imaginární vrstvy a i je časový krok.

Pro účely této práce nebude v následujících výsledcích experimentů použita velikost tepelného odporu, ale její převrácená hodnota značící součinitel přestupu tepla v kontaktu h_k

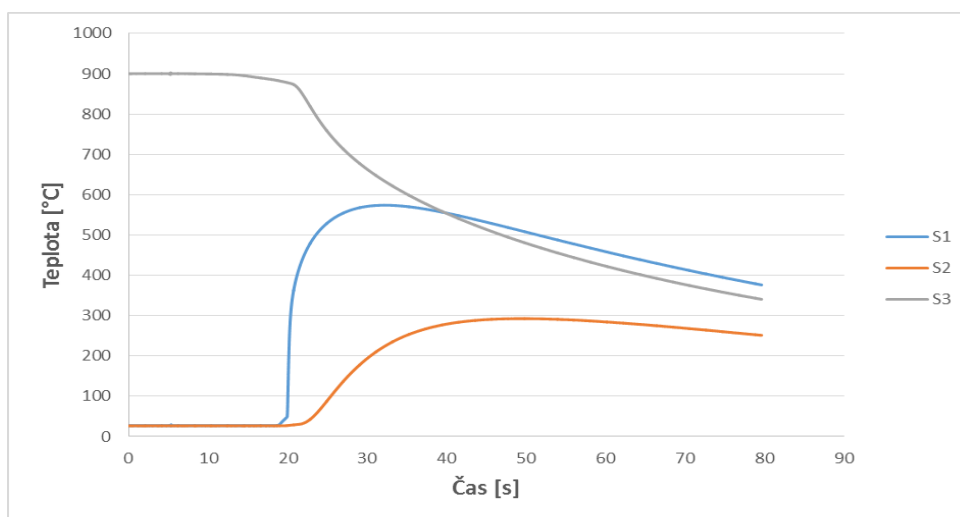
$$h_k = \frac{1}{R} \quad (7)$$

Důvodem je lepší vypovídající hodnota součinitele přestupu tepla v kontaktu, která se častěji používá jako obecná okrajová podmínka v numerických simulacích.

4.4 POPIS EXPERIMENTU A JEHO VYHODNOCENÍ

Před vlastním experimentem je nutné vzorek upravit tak, aby se s ní dalo lehce manipulovat při vytahování z pece a vkládat do posuvného stolku experimentálního zařízení. Dále se pomocí hydraulického zvedáku nastaví požadovaná hodnota kontaktního tlaku. Experiment začíná vložením vzorku do pece, kde dojde k nahřátí na předepsanou teplotu. Během nahřívání dojde ke kontrole dataloggeru, který slouží k ukládání naměřených teplot z termočlánků umístěných v čidle a vzorku a zapne se ukládání teplot těsně před vyjmutím vzorku z pece. Pak je vzorek položen na posuvný stolek a i se stolkem zasunut pod senzor. Následuje odjištění spodního válce a vytvoření kontaktu mezi vzorkem a senzorem. Měření trvá přibližně minutu a poté dojde k vypnutí záznamu teplot a stáhnutí dat do počítače.

Byl proveden testovací experiment, u kterého byla počáteční teplota vzorku nastavena na 900 °C, kontaktní tlak 100 MPa, drsnost povrchu vzorku 7,2 Ra, drsnost povrchu senzoru 0,8 Ra. Během celého experimentu byly zaznamenávány teploty ve všech třech teplotních čidlech S1 – S3 (Obrázek 11).

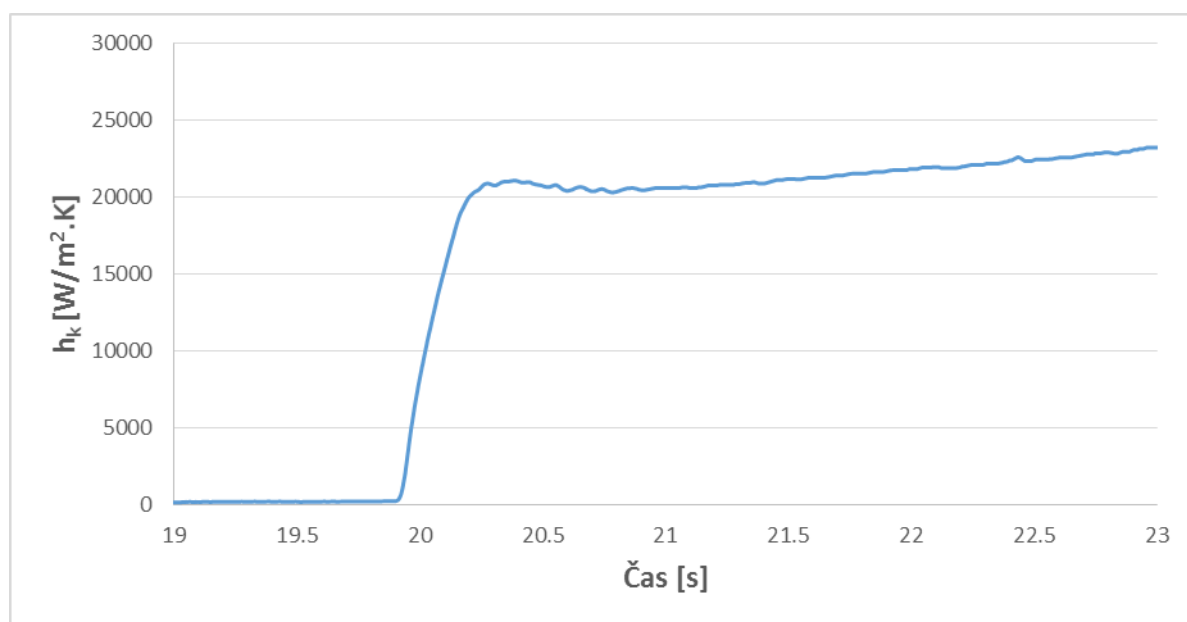


Obrázek 11: Změřené teploty během experimentu

Při výpočtu byla použita inverzní metoda vedení tepla a optimalizoval součinitel tepelné vodivosti imaginárního rozhraní v každém výpočtovém kroku tak, aby se nasimulovaná teplota v místě teplotního čidla S1 co nejvíce blížila naměřené teplotě v senzoru během experimentu. Z průběhu součinitele tepelné vodivosti se pomocí rovnice (6) a (7) získá průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu, který je zobrazen viz Obrázek 12.

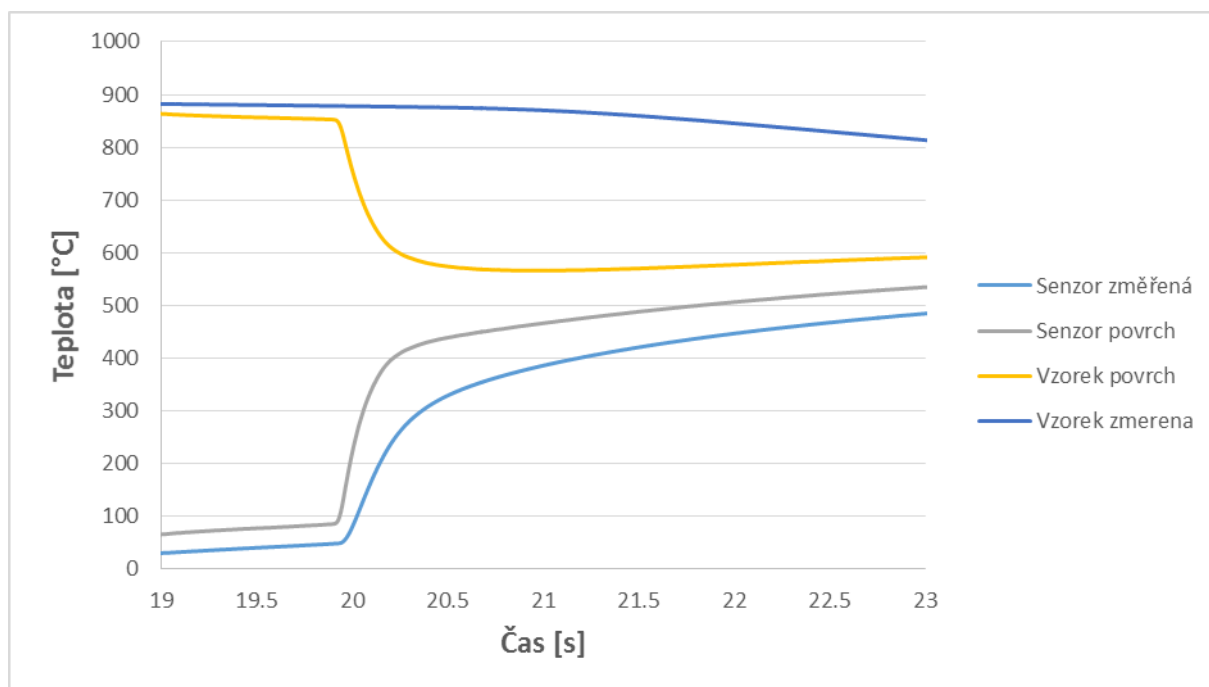
Dle obrázku je možno průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu rozdělit na tři části: první část je časově vymezena od 0 do 19,9 s a s hodnotou součinitele přestupu tepla blízkou nule představuje část experimentu před vytvořením kontaktu; druhá část je časově vymezena od 19,9 do 20,3 s, kde po vytvoření kontaktu dochází k prudkému nárůstu součinitele přestupu tepla v kontaktu; třetí část je časově vymezena od 20,5 s dále a došlo k ustálení hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu. Jako výslednou hodnotu součinitele přestupu tepla v kontaktu pro tento a další experimenty je brána hodnota přibližně 0,5 s po ustálení (v případě tohoto testovacího experimentu je to hodnota součinitele přestupu tepla v čase 20,6). Důvodem, proč byl zvolen čas 0,5 s, je ten, že v tom časovém okamžiku by již měl být průběh součinitele přestupu tepla ustálen. Podobně odečítání hodnot součinitele přestupu tepla v kontaktu provedl i Fieberg [7].

Pro tento testovací experiment se hodnota součinitele přestupu tepla v kontaktu pohybuje kolem $20200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Obrázek 12: Výsledná závislost součinitele přestupu tepla v kontaktu

Výsledkem numerické simulace je kromě průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu i průběh povrchových teplot senzoru a vzorku viz Obrázek 13.



Obrázek 13: Změřené a vypočítané teploty senzoru a vzorku

4.5 VÝSLEDKY

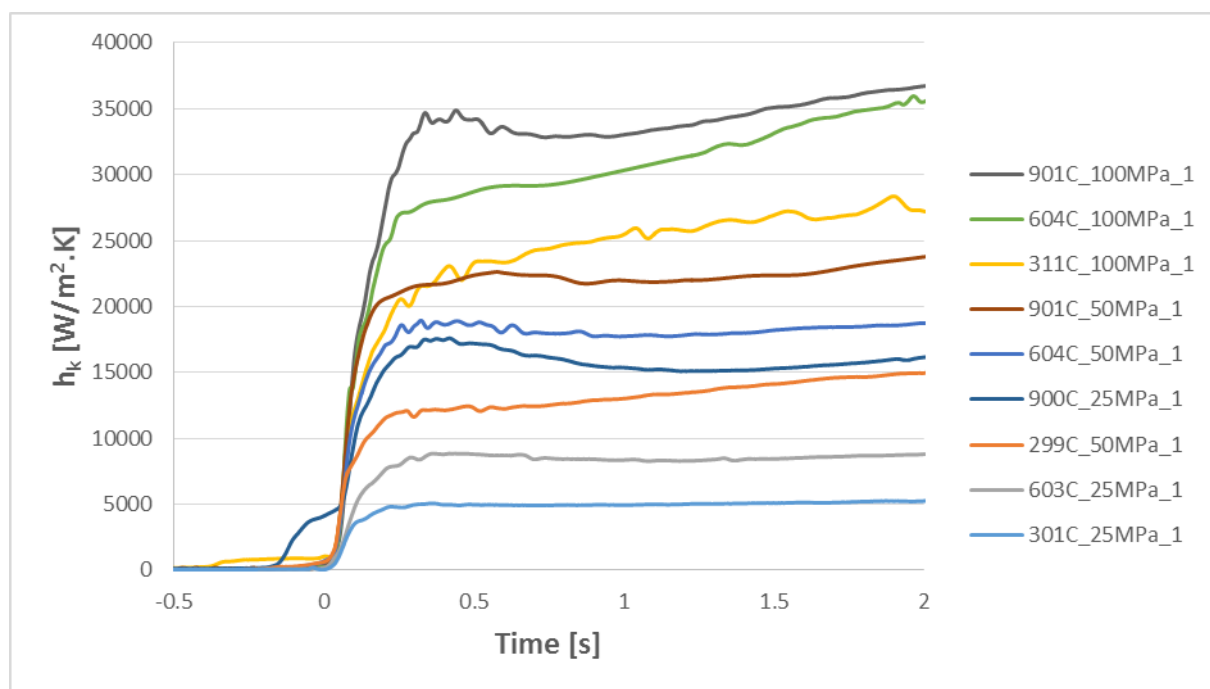
Bylo provedeno několik experimentů, které měli ukázat vliv parametrů (kontaktní tlak, teplota, drsnost povrchu) na velikosti součinitele přestupu tepla v kontaktu. Materiálem pro vzorek a senzor byla použita nerezová ocel DIN 1.4828. Experimenty byly navrženy, tak aby pokryly co největší oblast, kterou umožňuje nastavení experimentálního zařízení.

Nejdříve byly provedeny dvě sady měření po 9 experimentech, které se liší velikostí drsnosti povrchu vzorku. U první sady měření byl povrch vzorku i senzoru obroben a vznikl povrch s drsností Ra 0,8. U druhé sady byl obroben pouze senzor, povrch vzorku byl neupravený s drsností Ra 7,2.

Třetí sada experimentů byla navrhována tak, aby simulovala tepelný odpor v kontaktu mezi opěrným válcem a provalkem při kontinuálním lití oceli, což odpovídá kontaktu rovinného a válcového tělesa. Při experimentech (Tabulka 3) byl kontakt opěrného válce a provalku zjednodušen do podoby kontaktu dvou rovinných ploch, kterými se zabývá tato práce. Výstupem byl článek [11] ve spolupráci s firmou ArcelorMittal East Chicago sídlící ve Spojených státech amerických.

Tabulka 1: Sada 1, parametry experimentů, drsnost povrchu vzorku Ra 0,8

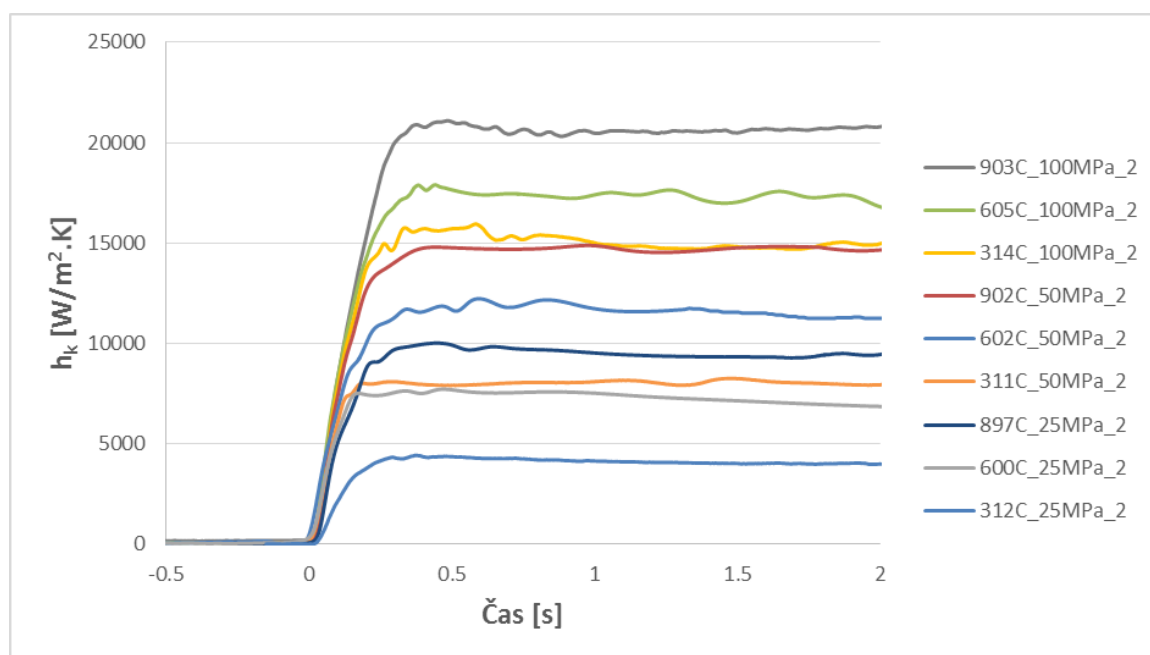
Název experimentu	Počáteční teplota [°C]	Tlak [MPa]	Povrch senzoru / materiál	Povrch vzorku / materiál
301C_25MPa_1	301	25	obrobený (Ra 0,8) / nerezová ocel DIN 1.4828	obrobený (Ra 0,8) / nerezová ocel DIN 1.4828
299C_50MPa_1	299	50		
311C_100MPa_1	311	100		
603C_25MPa_1	603	25		
604C_50MPa_1	604	50		
604C_100MPa_1	604	100		
900C_25MPa_1	900	25		
901C_50MPa_1	901	50		
901C_100MPa_1	901	100		



Obrázek 14: Průběhy součinitele přestupu tepla v kontaktu, drsnost vzorku Ra 0,8

Tabulka 2: Sada 2, parametry experimentů, drsnost povrchu vzorku Ra 7,2

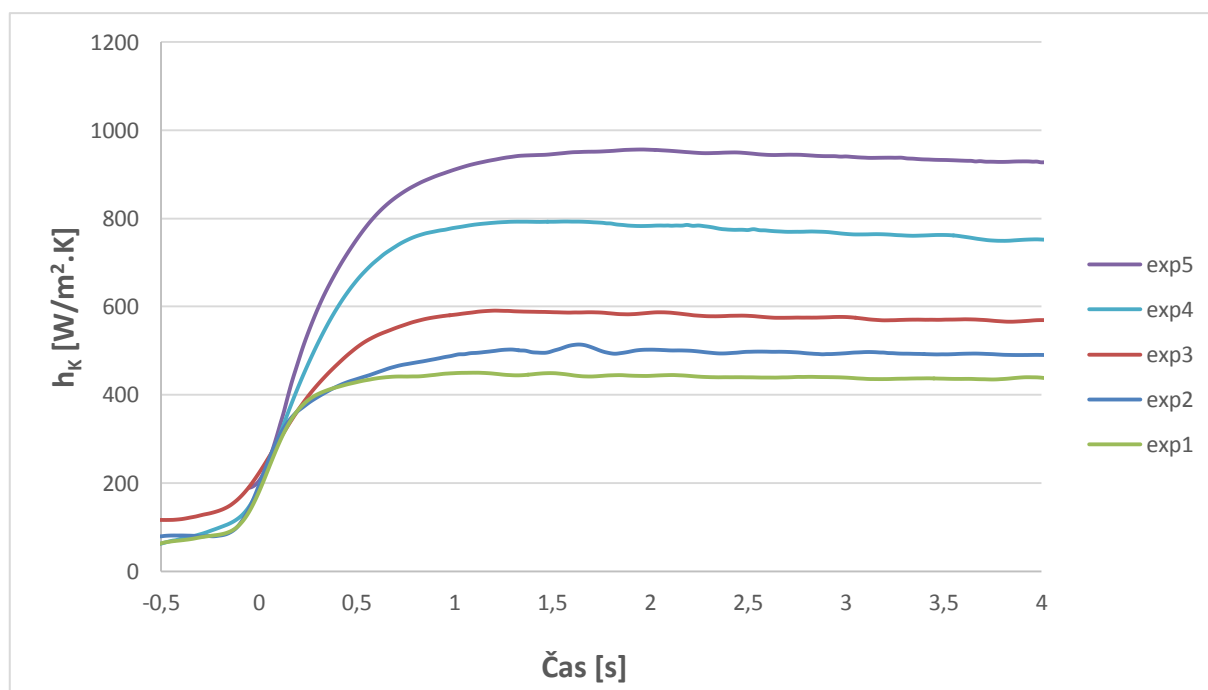
Název experimentu	Počáteční teplota [°C]	Tlak [MPa]	Povrch senzoru / materiál	Povrch vzorku / materiál
312C_25MPa_2	312	25	obrobený (Ra 0,8) / nerezová ocel DIN 1.4828	neupravený (Ra 7,2) / nerezová ocel DIN 1.4828
311C_50MPa_2	311	50		
314C_100MPa_2	314	100		
600C_25MPa_2	600	25		
602C_50MPa_2	602	50		
605C_100MPa_2	605	100		
897C_25MPa_2	897	25		
902C_50MPa_2	902	50		
903C_100MPa_2	903	100		



Obrázek 15: Průběhy součinitele přestupu tepla v kontaktu, sada 2, drsnost vzorku Ra 7,2

Tabulka 3: Sada 3, parametry experimentů, kontinuální lití oceli

Název	Počáteční teplota vzorku [°C]	Tlak [MPa]	Drsnost povrchu vzorku	Součinitel přestupu tepla [$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$]
exp1	800	0.2	Ra 3.5	445
exp2	800	0.4	Ra 3.5	502
exp3	800	0.6	Ra 3.5	582
exp4	800	0.8	Ra 3.5	783
exp5	800	1	Ra 3.5	956



Obrázek 16: Průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu pro experimenty simulující kontakt opěrného válce a bramy při kontinuálním lití

Tabulka 4: Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla pro odvození empirického vztahu pro první dvě sady měření

Počáteční teplota [°C]	Tlak [MPa]	Drsnost [Ra]	Součinitel přestupu tepla v kontaktu [W/m ² .K]	Rezidua z lineární regrese
301	25	0,8	4964	-2807,19
299	50	0,8	12358	289,237
311	100	0,8	23325	778,132
603	25	0,8	8838	-2446,23
604	50	0,8	18627	1617,32
604	100	0,8	28769	327,665
900	25	0,8	17126	2392,83
901	50	0,8	22247	899,641
901	100	0,8	33122	-1323,49
312	25	7,2	4375	-2370,16
311	50	7,2	7722	375,947
314	100	7,2	15669	708,59
600	25	7,2	7732	-825,654
604	50	7,2	11612	-70,7961
604	100	7,2	17527	-391,484
897	25	7,2	9971	-396,939
902	50	7,2	14767	843,637
903	100	7,2	20952	-13,4229

Výsledný empirický vztah pro odvození součinitele přestupu tepla v kontaktu

$$h_k^{emp} = 9,25644 \cdot T + 168,11 \cdot p + 346,166 \cdot \sigma + 0,121614 \cdot T \cdot p - 10,4959 \cdot p \cdot \sigma - 0,61 \cdot T \cdot \sigma - 0,00947 \cdot T \cdot p \cdot \sigma \quad (8)$$

kde T je teplota vzorku z intervalu $\langle 300, 900 \rangle$ °C, p je kontaktní tlak z intervalu $\langle 25, 100 \rangle$ MPa, σ je drsnost povrchu materiálu z intervalu $\langle 0,8, 7,2 \rangle$ Ra. Výsledná rezidua mezi empirickým vztahem a vypočtenými hodnotami z experimentálních měření jsou uvedeny viz Tabulka 4.

4.6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V této práci jsou zveřejněny výsledky experimentálních měření pro kontakt dvou těles (senzor, vzorek) vyrobených z nerezové oceli DIN 1.4828 za různých kontaktních tlaků (25 – 100 MPa), pro různé počáteční teploty vzorku (300 – 900 °C) a při použití dvou drsností povrchu vzorku (R_a 0,8, 7,2). Výsledné průběhy součinitele přestupu tepla v kontaktu jsou zobrazeny v grafech (pro drsnost povrchu vzorku R_a 0,8 Obrázek 14 a pro R_a 7,2 Obrázek 15).

Optimální průběh součinitele přestupu tepla v kontaktu je z počátku rychlý nárůst a poté by měl následovat konstatní průběh. To je dobře viditelné pro sadu experimentů s drsností povrchu vzorku R_a 7,2 (Obrázek 15). Pro sadu experimentů s drsností povrchu vzorku R_a 0,8 (Obrázek 14) je vidět, že několik experimentů má místo konstantní tendence spíše rostoucí (např. experiment 901C_100MPa_1). Tento jev je výrazný pro vysoké kontaktní tlaky a vysoké teploty. Jelikož je součinitel přestupu tepla definován jako podíl tepelného toku a rozdílu povrchových teplot, tak při malých rozdílech povrchových teplot těles v kontaktu může dojít k nestabilitě průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu. Podobný jev lze sledovat i ve výsledcích publikací [7] a [10]. Důvodem tohoto chování je numerická chyba při výpočtu z důvodu velké citlivosti součinitele přestupu tepla v kontaktu na rozdílu povrchových teplot tělese v kontaktu.

Experimentální měření publikované v této práci ukazují velmi silnou závislost součinitele přestupu tepla na kontaktním tlaku, závislost na drsnosti povrchu vzorku je rovněž výrazná. Z výsledků je patrná i závislost součinitele přestupu tepla v kontaktu na počáteční teplotě vzorku. Ačkoliv Fieberg [7] uvádí, že teplotní závislost by měla být více znatelná až od 500 °C, kdy dochází k plastické deformaci kontaktních ploch. Ve výsledcích z experimentů publikovaných v [10] je však rovněž patrný vliv teploty na součinitele přestupu tepla i při teplotách pod 500 °C.

Porovnat výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu uvedených v této práci s jinými publikacemi je značně obtížné. Hlavním důvodem je malý počet studií, které se touto problematikou zabývají. Fieberg [7] zveřejnil ve svém článku výsledek experimentu, kde byly v kontaktu dvě tělesa z oceli při kontaktním tlaku 34 MPa s výsledným součinitelem tepla v kontaktu 14500 W/m².K). Fieberg bohužel ve svém článku neuvedl přesný typ oceli a drsnost povrchu materiálu v kontaktu. Z výsledků této práce je dle podmínek nejbližší experiment 301C_50MPa_1 s výslednou hodnotou součinitele přestupu tepla v kontaktu 12358 W/m².K.

Malinowski [10] publikoval studii, kde měřil součinitele přestupu tepla za kontaktního tlaku 30 – 90 MPa a počáteční teploty jednoho z těles 300 – 900 °C při

použití nerezové oceli DIN 303. Drsnost povrchu prvního tělesa R_a 0,42 μm a druhého R_a 0,61 μm . Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu byly maximálně 20000 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$. S porovnáním s první sadou měření (Obrázek 14), kde maximální hodnota dosáhla až 33000 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, jde o značný rozdíl. Autor této práce se domnívá, že důvodem je použití jiného typu nerezové oceli, kde nerezová ocel DIN 303 má od teploty 300 °C vyšší součinitel tepelné vodivosti než DIN 1.4828. Vyšší tepelná vodivost má za následek zvýšení rozdílu povrchových teplot těles v kontaktu a díky tomu snížení velikosti součinitele přestupu tepla v kontaktu.

Součástí této práce jsou i průběhy součinitele přestupu tepla pro velmi nízký tlak (0,2 – 1 MPa) a pro vysokou teplotu (800 °C) simulující kontakt opěrného válce s provalkem ve zjednodušeném provedení experimentu (kontakt dvou rovinných ploch). Získané hodnoty součinitele přestupu tepla v kontaktu jsou v intervalu 450 – 1000 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$.

5 ZÁVĚR

Hutní průmysl investuje nemalé prostředky do zlepšení výroby. Testování přímo ve výrobě je v současné době stále velice nákladné, a proto se velmi často používají numerické simulace, které se snaží co nejlépe popsat výrobní proces z pohledu výměny tepla. Vstupem do numerických simulací vedení tepla jsou okrajové podmínky, z nichž některé nejsou ani v současné době dostatečně popsány. Jednou z takových okrajových podmínek je tepelný odpor v kontaktu, který je sice dobře popsán pro potřeby v elektrotechnice, letectví, atd., kde je použit nízký kontaktní tlak (jednotky MPa) a malý rozdíl teplot mezi tělesy (max. 300 °C). Existuje i celá řada empirických vztahů, které docela přesně odvozují hodnotu tepelného odporu v kontaktu po daný kontaktní tlak a teploty. V hutním průmyslu se ale tepelný odpor vyskytuje za specifických podmínek, tj. vysokých kontaktních tlaků (až stovek MPa) a vysokých teplot (až 1200 °C). Při těchto až extrémních podmínkách ale empirické vztahy pro odhad tepelného odporu v kontaktu nefungují a je třeba experimentálních měření, které simulují kontakty dvou těles za podobných podmínek jako ve výrobě.

Tato práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou uvedeny základní rovnice přenosu tepla, popsána numerická simulace vedení tepla spolu s inverzní úlohou. Následuje řešeršní studie o tepelném odporu v kontaktu spolu s odvozením empirických vztahů pro odhad tepelného odporu v kontaktu za nízkých teplot a nízkých kontaktních tlaků.

Praktická část se zabývá popisem experimentálního zařízení a metodiky pro výpočet tepelného odporu v kontaktu. Metodika je založena na měření teploty během kontaktu dvou těles (senzor, vzorek) a dokáže odvodit velikost tepelného odporu v kontaktu pro různé nastavení kontaktních tlaků, typu materiálu, počáteční teploty, drsnosti povrchu, přítomnosti okují atd. Ke zpětné simulaci experimentálního měření a odvození tepelného odporu v kontaktu je použit numerický výpočet, který využívá imaginární vrstvy, která je vložena mezi tělesa, a změnou její tepelné vodivosti je nastaveno množství tepla, které přestupuje z jednoho tělesa do druhého.

Byly provedeny tři sady experimentů, při kterých byl senzor a vzorek vyroben z nerezové oceli DIN 1.4828. První dvě sady měly ukázat vliv kontaktního tlaku (25 – 100 MPa), počáteční teploty (300 – 900 °C) a drsnosti povrchu (R_a 0,8 a 7,2) na velikost tepelného odporu v kontaktu. Třetí sada experimentu, simulující dotyk opěrného válce s provalkem během kontinuálního lití oceli, byla provedena za nízkých tlaků (0,2 – 1 MPa) a vysokých teplot (800 °C). Výsledky všech sad měření jsou uvedeny ve formě průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu. V závěru je

uveden empirický vztah pro součinitele přestupu tepla v kontaktu, který vznikl zobecněním výsledků z prvních dvou sad experimentálních měření.

Přínosem této práce je vytvoření metodiky měření kontaktního odporu pomocí experimentálního zařízení, které umožňuje nastavit různé parametry ovlivňující tepelný odpor a simulovat tak reálný děj z praxe. Výsledky z měření mohou být použity jako okrajové podmínky do numerických simulací, což vede k lepšímu pochopení fyzikálního procesu během výroby např. v hutním průmyslu.

Tato práce se zabývala vyšetřování tepelných odporů v kontaktu rovinných ploch s různými parametry. Dále se počítá s rozvojem metodiky měření i pro kontakt rovinné a válcové plochy, která bude simulovat kontakt opěrného válce s provalkem při kontinuálním lití oceli a další fází bude snaha o co největší se přiblížení podmínkám, které panují při válcování za tepla.

6 LITERATURA

- [1] MADHUSUDANA, C. *Thermal contact conductance*. New York: Springer, c1996, 165 s. Mechanical engineering series. ISBN 03-879-4534-2.
- [2] HU, Shi-cheng, Wei-ce MA, Lei DU, Xiao-qian LI a Jue ZHONG. Thermal contact conductance at continuous roll-casting interface. *Journal of Central South University of Technology*. 2007, roč. 14, č. 3, s. 374-379. ISSN 1005-9784. DOI: 10.1007/s11771-007-0074-4.
- [3] BOWDEN, F. P. a D. TABOR. *The friction and lubrication of solids*. London: Oxford University Press, 1950, 391 s.
- [4] POHANKA, M. Technical Experiment Based InverseTasks in Mechanics, Ph.D. Thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, 2006. 142 s.
- [5] WILLIAM H. P., SAUL A. T. , WILLIAM T. V., BRIAN P. F. Numerical Recipes in C. 2nd ed. 1997.
- [6] MIKIĆ, B.B. Thermal contact conductance; theoretical considerations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1974, roč. 17, č. 2, s. 205-214. ISSN 00179310. DOI: 10.1016/0017-9310(74)90082-9.
- [7] FIEBERG, C. a R. KNEER. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008, 51(5-6), 1017-1023. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.004. ISSN 00179310.
- [8] WANG, AnLiang a JianFeng ZHAO. Review of prediction for thermal contact resistance. *Science China Technological Sciences*. 2010, roč. 53, č. 7, s. 1798-1808. ISSN 1674-7321. DOI: 10.1007/s11431-009-3190-6.
- [9] BELLEROVÁ, H. Rozvoj inverzních úloh vedení tepla se zaměřením na velmi rychlé procesy v mikroskopických měřících. Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 108 s.
- [10] MALINOWSKI, Z., J.G. LENARD a M.E. DAVIES. A study of the heat-transfer coefficient as a function of temperature and pressure. *Journal of Materials Processing Technology*. 1994, 41(2), 125-142. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90057-4. ISSN 09240136.
- [11] HORSKÝ, J.; KVAPIL, J.; KENETH, B.; MORAVEC, R. Determination of Thermal Contact Conductance Based on Unsteady Temperature Measurement. In AISTech 2015. 2015. p. 3519-3525. ISBN: 978-1-935117-46- 9.

ABSTRAKT

V poslední době se v průmyslu stále častěji používají numerické simulace k optimalizaci výrobních procesů. Tyto numerické simulace ale potřebují velké množství vstupních parametrů a některé z těchto parametrů nejsou dosud dostatečně popsány. Jedním z těchto parametrů je tepelný odpor v kontaktu, který je v literatuře nedostatečně popsán pro vyšší teploty a vyšší kontaktní tlaky.

Tato práce předkládá metodiku jak tepelný odpor experimentálně měřit a odvodit součinitel přestupu tepla v kontaktu, který je převrácenou hodnotou k tepelnému odporu a může být v numerických simulacích použit jako okrajová podmínka popisující kontakt dvou těles.

Pro účely experimentálních měření tepelného odporu bylo v Laboratoři přenosu tepla a proudění, VUT v Brně sestrojeno experimentální zařízení, které umožňuje měřit tepelný odpor mezi dvěma tělesy za různých podmínek, které vzniknou nastavením parametrů, jakými jsou např. kontaktní tlak, počáteční teplota těles, typ materiálu, drsnost povrchu těles, přítomnost okujů na povrchu atd. Tělesa v kontaktu se označují jako senzor a vzorek a jsou v nich zabudována teplotní čidla, která při experimentu zaznamenávají teplotu. Poté jsou teplotní průběhy použity v numerickém výpočtu, který využívá inverzní metodu vedení tepla. Výsledkem výpočtu je stanovení průběhu součinitele přestupu tepla v kontaktu během experimentu. Na závěr jsou výsledky shrnuty a je popsáno chování tepelného odporu v závislosti na parametrech, které ho ovlivňují.

ABSTRACT

Nowadays numerical simulations are used to optimize manufacturing process. These numerical simulations need a large amount of input parameters and some of these parameters have not been sufficiently described. One of this parameter is thermal contact resistance, which is not sufficiently described for high temperatures and high contact pressure.

This work describes experimental measuring of thermal contact resistance and how to determine thermal contact conductance which can be used as a boundary condition for numerical simulations.

An Experimental device was built in Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory, part of Brno University of Technology, and can be used for measuring thermal contact conductance in various conditions, such as contact pressure, initial temperatures of bodies in contact, type of material, surface roughness, presence of scales on contact surface. Bodies in contact are marked as a sensor and a sample, both are embedded with thermocouples. The temperature history of bodies during an experiment is measured by thermocouples and then used to estimate time dependent values of thermal contact conductance by an inverse heat conduction calculation. Results are summarized and the dependence of thermal contact resistance in various conditions is described.

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Jméno	Jiří Kvapil
Adresa	Dětrichov u Moravské Třebové 25 571 01 Moravská Třebová Česká republika
Telefon	+420 737 463 324
Email	jirikvapil@gmail.com

Zaměstnání

9/2015 – dosud	OR-CZ spol. s r.o., vývojář software
2/2012 – 8/2015	VUT v Brně, fakulta strojní, vědecký pracovník

Vzdělání

2009 – dosud	Studium PhD. Laboratoř přenosu tepla a proudění, FSI VUT v Brně obor Inženýrská mechanika
2007 – 2009	Titul Inženýr Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, obor Matematické inženýrství
2004 – 2007	Titul Bakalář Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, obor Matematické inženýrství
1996 – 2004	Gymnázium Moravská Třebová, Svitavská 16, Moravská Třebová

Studijní pobyty

10/2012 – 3/2013	voestalpine AG, Linec, Rakousko
------------------	---------------------------------

Znalosti a dovednosti

PC znalosti	Borland Delphi 7, Matlab, Java, C++, HTML, CSS, Javascript MS Office, MS Windows, Wolfram Mathematica
-------------	--

Jazykové znalosti Angličtina – pokročilý
 Čeština – rodilý mluvčí
 Němčina – začátečník

Řidičský průkaz A1, B, C, CE, T

Vlastnosti a zájmy

Sport, včelařství, počítače